بهینه‌سازی و بهبود عملیات تطابق تاریخچه خودکار با استفاده از روش سطح رویه پاسخ و الگوریتم ژنتیک-مطالعه موردی در یک میدان بزرگ نفتی جنوب غرب ایران

مجتبی کریمی[1*] و علی مرتضوی[2]

۱- پژوهشکده مطالعات مخازن، پردیس توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۹

چکیده

تطابق تاریخچه یکی از مهمترین بخش‌های شبیه‌سازی مخازن و به تبع آن مطالعه مخزن است و افزایش سرعت در انجام این عملیات در عین دقت یکی از چالش‌های کنونی دانش مهندسی نفت است. در این مطالعه، سعی شده است با بهره‌گیری از مدل پروکسی و بهینه‌سازی دقیق، فرآیند «تطابق تاریخچه» که یکی از مهمترین مراحل در مطالعه جامع مخزن است با زمان اجرای بسیار کمتر انجام گیرد. در این مقاله رویکرد ریاضی مدل جایگزین (پروکسی) برای تطابق تاریخچه خودکار در یک میدان بزرگ در جنوب ایران با ۱۴ چاه با متغیرهای پاسخ‌های (تولید نفت و داده‌های فشار) استفاده شده است. روشی که به عنوان مدل پروکسی استفاده شده است روش سطح رویه پاسخ است که در آن ۲۱ پارامتر برای ساخت مدل با استفاده از روش مکعب متمرکز بر وجه که از جمله روش‌های نمونه‌گیری مرکزی معرفی شده است. سپس برای پروکسی ساخته شده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شد. روش کار استفاده شده در این مقاله کدنویسی و برنامه‌نویسی در Matlab و لینک آن با نرم‌افزار شبیه‌سازی Eclipse برای بررسی و نهایی‌سازی پارامترها بود. در نتیجه، ساخت مدل پروکسی بهینه‌سازی شده (با الگوریتم ژنتیک) با استفاده از ۲۵۶ نمونه با R^2 ۰/۹ موفق عمل کرد.

کلمات کلیدی: تطابق تاریخچه خودکار، مدل پروکسی، سطح رویه پاسخ، الگوریتم ژنتیک، روش مکعب متمرکز بروجه.

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی karimimoj@ripi.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2017.2716.2250)

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

هدف از مدیریت مخزن، تدوین و توسعه استراتژی‌ها برای حداکثرکردن بازیافت و تولید هیدروکربور است. شبیه‌سازی مخزن اصولا یک روش تصمیم‌گیری برای رسیدن به این هدف مدیریت مخزن است. صحت و درستی مدل‌ها و شبیه‌سازها مهمترین مسئله در این زمینه است. یکی از اهداف مهم شبیه‌سازی، تعریف یک مدل مخزنی است که اطلاعات دینامیکی و استاتیکی مخزن را در برگیرد. اصولاً بعد از ساخت مدل مخزنی، باید آن را با اطلاعات و مدل‌های تفسیری موجود مطابقت داد. مدل بر اساس داده‌های ذکر شده ساخته شده است و در نتیجه مدل باید اطلاعات تاریخچه را بازتولید کند. پس از صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده، می‌توان آن را برای پیش‌بینی عملکرد آینده مخزن، تحت سناریوهای مختلف توسعه مورد استفاده قرار داد.

فرآیند "تطابق تاریخچه" یک فرآیند تنظیم مدل مخزن با تنظیم مقادیر پارامترهای مخزن نامشخص به منظور دستیابی به تطابق بهتر بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده است. در تطابق تاریخچه متداول، مقادیر پارامترهای نامطمئن مخزن به صورت دستی با آزمون و خطا تنظیم می‌شود تا زمانی که یک تطابق کافی به دست آید. در اغلب موارد، تطابق تاریخچه، ظریف، جامع و زمان بر است و علاوه بر این در برخی موارد رسیدن به یک تطابق قابل قبول با روش متعارف دشوار است.

تطابق تاریخچه کمکی یا خودکار[1] (AHM) متشکل از تکنیک‌های بهینه‌سازی است که به طور خودکار پارامترهای نامطمئن مخزن را تنظیم می‌کند تا معیارهای تطابق به‌دست آید. هدف این است که تطابق تاریخچه زمان کمتری صرف کند و قابل اعتماد باشد. روش‌های AHM مطالعه شده در این کار شامل استفاده از نمونه‌گیری با استفاده از تکنیک‌های طراحی آزمایش، ساخت مدل پروکسی و نهایتا بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم نوین بهینه‌سازی به عنوان ابزاری برای یافتن راه حل‌های منطبق می‌باشد. در این مقاله بر یک تحقیق جامع از روش تاکید شده است. با توجه به انجام مطالعات و تحقیقات در این زمینه، به‌کارگیری همزمان روش‌های هوشمند، انتخاب و غربالگری پارامترهای مخزنی، تعریف و ساخت مدل پروکسی و بهینه‌سازی آن در یک میدان بزرگ واقعی مورد اجرای دقیق قرار نگرفته است. بنابراین در این مطالعه ضمن ارائه الگوریتم تطابق تاریخچه خودکار، روش کار در مورد یک مخزن نفتی بزرگ واقع در جنوب ایران بحث می‌شود.

ساخت مدل پروکسی

در کارهای گذشته، به اهمیت مدل پروکسی به عنوان جایگزینی برای شبیه‌سازی‌های مخزن و بررسی جوانب مثبت و منفی آن پرداخته شده است[۲]. برخی از محققان پروکسی‌هایی به عنوان ابزار مدیریت مخزن نوآورانه ارائه کردند. تاکنون مدل‌های پروکسی در مدل‌سازی مکانیسم‌های ازدیاد برداشت همچون ازدیادبرداشت به روش فرآیند ریزش ثقلی به کمک بخار[1] مورد استفاده قرار گرفته است[۹-۳]. استفاده از مدل پروکسی برای جایگزینی شبیه‌ساز در روش تطابق تاریخچه، سرعت کار را به‌گونه فزاینده‌ای افزایش می‌دهد. از میان مدل‌های ریاضی شناخته شده برای جایگزینی شبیه‌ساز، روش سطح پاسخ[3]، روشی قابل قبول و مطمئن است چراکه این روش برای مسائلی قابل کاربرد است که پاسخ مسئله (هدف) تحت تاثیر چندین عامل مستقل (ورودی) قرار دارد و هدف اصلی بهینه‌سازی این پاسخ است. در این روش چگونگی روابط بین یک یا چند پاسخ با کمک تأثیر عوامل مستقل اندازه‌گیری می‌شود. این روش مبتنی بر دنباله‌ای از آزمایش‌ها است که

1. Assisted (Automated) History Matching
2. SAGD
3. Response Surface Method (RSM)

Archive of SID

www.SID.ir

هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرآیند است که در این مقاله، از این روش استفاده شده است.

بیان این نکته لازم است که پیش از ساخت مدل پروکسی، بایستی عملیات غربالگری اولیه پارامترها و طراحی نمونه آزمایش برای مشخص کردن نمونه‌های اولیه انجام گیرد. روش‌های متنوعی برای این هدف وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به بلاکت بورمن، باکس بنکن، روش‌های فاکتوریل، لاتین هایپرکیوب و غیره اشاره کرد.

آنالیز حساسیت و غربالگری پارامترهای نامشخص اولیه

مدل‌های مخزن عموما از پارامترهای زیرسطحی با عدم قطعیت بالا ساخته می‌شود. لذا انجام عملیات تطابق تاریخچه برای لحاظ کردن تمام پارامترهای نامشخص امکان‌پذیر نبوده و لازم است صرفا حساس‌ترین و مهمترین پارامترهای نامشخص را در برگیرد. بنابراین به منظور انتخاب حساس ترین پارامترها، یک فرآیند غربالگری مورد نیاز است. یکی از روش‌های نوین برای این هدف، استفاده از طراحی آزمایش[1] است. در تطابق تاریخچه کمکی، بهره‌گیری از طراحی آزمایش و ساخت مدل پروکسی می‌تواند جایگزین مناسبی برای شبیه‌سازی مخزن منظور شود.

الگوریتم طرح آزمایش سطح رویه پاسخ

همان‌طور که در بخش قبل مختصرا بیان شد، طرح آزمایش رویه پاسخ یا RSM مجموعه‌ای از روش‌های آماری برپایه ریاضی برای مدل‌سازی و آنالیز مسئله است. این روش برای حالت‌هایی از مسئله قابل کاربرد است که پاسخ مسئله (هدف) تحت تاثیر چندین عامل مستقل (ورودی) قرار دارد و هدف اصلی بهینه‌سازی این پاسخ است. در این روش چگونگی روابط بین یک یا چند پاسخ با کمک تأثیر عوامل مستقل اندازه‌گیری می‌شود. این روش مبتنی بر دنباله‌ای از آزمایش‌ها است که هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرآیند است [۱].

اهداف و موارد کاربرد RSM

به‌طور کلی اهداف روش RSM را می‌توان در سه سطح کلی توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیند دسته‌بندی کرد.

اول؛ برای به‌دست آوردن شرایطی با پایداری فرآیند یا غیرحساس بودن آن در مقابل تغییراتی که کنترل بر روی آن‌ها امکان‌پذیر نیست و یا کم است.

دوم؛ برای جایگزین کردن یک مدل با پیچیدگی بالا با یک مدل ساده‌تر با رگرسیون مرتبه دوم که قابلیت استفاده در یک ناحیه محدود را دارد. (یعنی جایگزینی مدل با یک متامدل، یا مدل جایگزین).

سوم؛ برای حالت‌هایی که تابع پاسخ در مسئله کاملاً شناخته شده نیست و یا در صورت شناخته شده بودن با هزینه بالا محاسبه شود مانند مسائل شبکه اجتماعی[2].

تعریف سطح پاسخ (رویه)

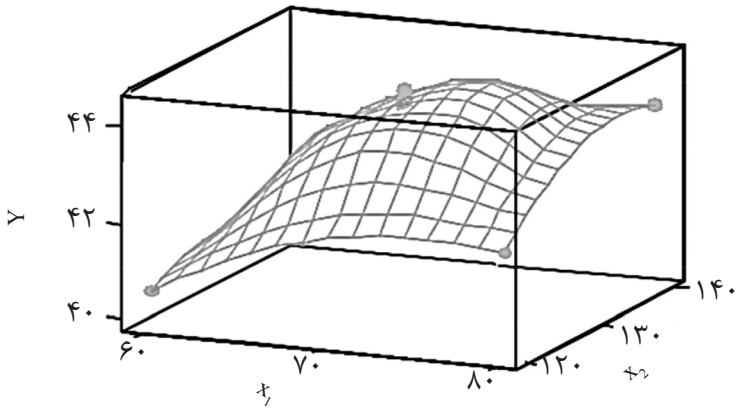
متغیرهای ورودی که با آن‌ها کنترل پاسخ، محقق می‌شود متغیرهای مستقل یا رگرسور می‌نامند. همچنین پارامترهای کمی و کیفی به عنوان پاسخ[3] یا متغیر وابسته در الگوریتم سطح رویه پاسخ، در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ به‌ازای هر مقدار x_1 و x_2 یک مقدار y تولید می‌شود. این شکل سه بعدی، سطح پاسخ را در سه جهت نشان می‌دهد که آن را نمودار رویه پاسخ[4] می‌نامند [۱]. در شکل ارائه شده، بخشی از سطح رویه پاسخ با برجستگی نشان داده است که شرایط سه‌بعدی این مسئله را بهتر نشان می‌دهد. همچنین بیان‌گر آنست که یک مدل چند جمله‌ای معمولاً تقریب خوبی از تابع پاسخ واقعی برای یک ناحیه کوچک است.

به منظور تهیه یک تقریب مناسب از f، یک آزمایش‌کننده معمولاً ابتدا با یک چندجمله‌ای درجه پایین در یک ناحیه کوچک آغاز به‌کار می‌کند.

1. Design of Experiment (DOE)
2. Social Network Problem
3. Response
4. Response Surface Plot

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱ سطح رویه پاسخ [۱]

به منظور تهیه یک تقریب مناسب از f، یک آزمایش‌کننده معمولاً ابتدا با یک چندجمله‌ای درجه پایین در یک ناحیه کوچک آغاز به‌کار می‌کند. اگر پاسخ قابل بیان با یک تابع خطی از متغیرهای مستقل باشد، تابع تقریب یک مدل مرتبه اول خواهد بود. نمونه یک مدل مرتبه اول با دو متغیر پاسخ مستقل به صورت رابطه ۱ نشان داده شده است. اگر خمیدگی در پاسخ وجود داشته باشد یعنی زمانی که عدم برازش مدل درجه اول اتفاق می‌افتد، نیاز به مدلی با ساختار قوی‌تر نظیر مدل درجه دوم، برای تعیین نقطه بهینه، مورد مطالعه قرار گرفته و در این صورت چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتری مورد استفاده واقع می‌شوند. تابع تقریب با دو متغیر پاسخ مدل درجه دو نامیده شده که شکل عمومی آن در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2 x_2+\varepsilon \qquad (۱)$$

تقریب تابع هدف برای یک مدل مرتبه اول زمانی است که پاسخ، تابعی خطی از متغیرهای مستقل باشد.

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_{11}x_1^2+\beta_{22}x_2^2+\beta_{12}x_1x_2+\varepsilon \qquad (۲)$$

در روابط ۱ و ۲، مقادیر ضرایب β_{kl} و β_j و β_i از طریق روش حداقل مربعات تعیین می‌شود که مجموع انحرافات بین مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی را به حداقل می‌رساند. ε معرف میزان خطای معادله است که بایستی به حداقل برسد.

در روش کلی RSM از یک یا از هردوی این مدل‌ها استفاده می‌شود و برای آنکه نتیجه کارایی از تقریب تابع به‌دست آید برای جمع‌آوری داده‌های اولیه می‌بایست طراحی آزمایش‌های مناسبی صورت گیرد [۶].

بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک

همانطور که پیشتر مطرح شد، بهینه‌سازی نقش مهمی در حل مسئله تطابق تاریخچه دارد چراکه می‌توانند به یافتن راه حل‌هایی برای یک تطابق تاریخچه قابل قبول کمک کند[۱۶-۱۴]. هر چند، در برخی اوقات بعضی الگوریتم‌ها در دام حداقل‌های محلی می‌افتند پیش از آنکه بتوانند راه حل‌های تطابقی را پیدا کنند. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی قدرتمند دامنه مستقل است که توسط نظریه داروین الهام گرفته است. الگوریتم ژنتیک الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است به این معنی که در هر تکرار بیش از یک راه حل تولید می‌شود. مفهوم اصلی این الگوریتم انتخاب طبیعی است که افراد قوی تر زنده می‌مانند و نیز ویژگی‌های قوی خود را برای فرزندان خود به ارث می‌گذارند. دو عملگر ژنتیکی اصلی در این الگوریتم وجود دارد به عنوان مثال، ادغام و جهش. ادغام عملگر ژنتیکی است که مکانیزمی برای فرزندانی که ویژگی‌های

Archive of SID

www.SID.ir

پدر و مادر را به ارث می‌برند فراهم می‌کند. جهش یک اپراتور براساس احتمالاتی است که برای برخی از افراد در جامعه اتفاق می‌افتد. با داشتن جهش، ویژگی‌های جدید به جمعیتی که از پدر و مادر خود ارث نمی‌برند معرفی شده است.

الگوریتم ازدحام ذرات

این روش که از جمله روش‌های بهینه‌سازی تصادفی است، براساس مدل رفتاری گروهی از پرندگان و ماهیان ساخته شده است. کارهای انجام شده توسط محققان توضیح می‌دهد که این روش بر خلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی با سرعت قابل قبولی عمل می‌کند. دلیل دیگر برای استفاده از PSO آنست که نیاز به تعداد کمتری پارامتر برای تنظیم دارد. همچنین فرمول آن ساده است و راحت اجرا می‌شود. فرمول این روش به‌صورت روابط ۳ و ۴ بیان می‌شود:

$$V_{i+1}=WV_i+c_1 r_1 (pbest_i-x_i)+c_2 r_2 (gbest_i-x_i) \quad (۳)$$

$$x_{i+1}=x_i+\Delta tV_{i+1} \quad (۴)$$

که در آن:

V: سرعت ذرات، r_1، r_2: دو عدد تصادفی ایجاد شده در بازه [۰، ۱] هستند.

- c_1 (اعتماد به خود)، c_2 (اعتماد ازدحام) به ترتیب شدت‌های جذب به pbest و gbest هستند.
- Δt پارامتر زمان است که گام پیشرفت ذرات است.
- W عامل اینرسی است که اثر سرعت را مدیریت می‌کند. در این کار مقدار ۱ برای w استفاده شده است.

مجموعه‌ای از راه‌حل‌های دلخواه تولید شده، به نام "ذرات" در فضای بزرگ مسئله پرواز می‌کنند. با توجه به معادلات جایگزین، موقعیت هر ذره با توجه به تجربه خودش (pbest) و همسایگانش (gbest) تغییر می‌کند.

متدلوژی و روش کار

همان‌طور که در مقدمه و مدل جایگزین بحث شد، روش‌های مختلفی برای تطابق تاریخچه وجود دارد. روش معرفی شده و اجرا شده در این مقاله مطابق شکل ۲ انجام شده است. طراح آزمایش برای تولید آزمایش های اولیه استفاده می شود، چراکه آزمایشات اساس ایجاد یک مدل پروکسی می‌باشند و روش‌های مختلفی برای تولید آزمایش‌های اولیه ارائه شده است. با این حال، در این مقاله از روش مکعب متمرکز بر وجه (CCF)[1] استفاده شده که برتری آن نسبت به برخی از روش‌های دیگر در تعداد اجراهای کمتر برای ساخت پروکسی است. به عبارت دیگر، استفاده از روش CCF به دلیل نیاز به تعداد اجراهای کمتر برای ساخت پروکسی و در نتیجه افزایش سرعت اجرای مدل است. از این رو، این روش به‌کار گرفته شد.

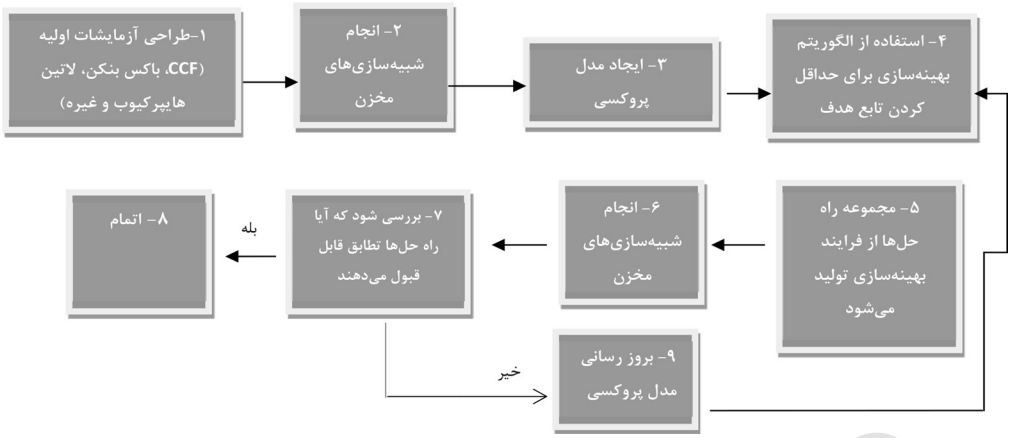
مدل پروکسی، شبیه‌سازی مخزن را در فرآیند بهینه‌سازی جایگزین خواهند کرد. الگوریتم بهینه‌سازی راه حل‌های بهینه‌ای را جستجو می‌کند که حداقل تابع هدف را می‌دهند. با این حال، این راه حل بهینه لزوما یک تطابق قابل قبول نمی‌دهد و بهینه‌سازی باید با یک مدل پروکسی بهبود تکرار شود. مدل پروکسی با اضافه کردن راه حل بهینه برای آزمایشات اولیه بهبود می‌یابد. این روش بازگشتی متوقف می‌شود زمانی که یک تطابق قابل قبول به دست آید.

بر اساس تجارب تحلیل‌های گذشته روی میدان مورد مطالعه و سطح دقت داده‌ها، ۲۱ پارامتر برای ایجاد نمونه‌ها با استفاده از روش CCF استفاده شد. همان‌طور که قبلا ذکر شد، برای کاهش زمان و سرعت بخشیدن به اجرای شبیه‌سازی، یک مدل پروکسی جایگزین مدل اصلی شد. ساخت پروکسی بارها تکرار شد تا یک مدل قابل قبول به دست آمد. در ادامه کار، روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک[2] GA برای مدل اعمال شدند تا بهترین راه حل را بیابند.

1. Central Composite Face-Centered
2. Genetic Algorithm

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲ الگوریتم انجام تطابق تاریخچه خودکار با مدل جایگزین بهینه‌سازی شده شبیه‌ساز

تابع هدف

جهت یافتن راه حل خوب تطابق، نیاز به تعریف یک تابع هدف است. معادله ۵ تابع هدف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف درصد متوسط خطای همه متغیرهای تطابق و گام‌های زمانی را نشان می‌دهد.

$$F_{obj} = \sum_{obj=wells}^{M} W_{obj} \sum_{Responses=OilProduction,BHP,BP9}^{N} W_{Responces} \sum_{timestep=1}^{P} \left(\frac{Y_{Hist} - Y_{Calc}}{SD * Y_{Hist}}\right)^2 \quad (۵)$$

F_{Obj}: تابع هدف تعریف شده برای بازه‌های زمانی

P: تعداد گام‌های زمانی

N: تعداد متغیرهای پاسخ

M: تعداد چاه‌ها

W_{obj} و $W_{Responces}$: فاکتورهای وزنی برای چاه‌ها و ریسپانس‌ها (که عبارت اند از تولید نفت، فشار ته چاه و فشار ۹ نقطه)

Y_{calc}: داده پاسخ محاسبه شده از مدل پروکسی

Y_{his}: داده‌های پاسخ مشاهده‌ای (واقعی)

SD: انحراف از معیار[1]

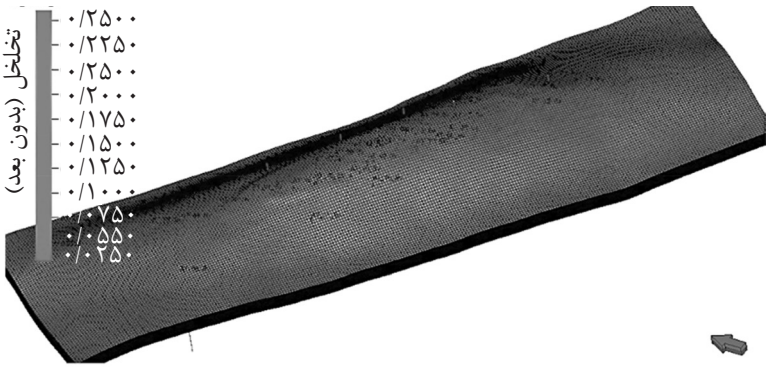
در این تابع هدف، میزان اثر هر چاه را شبیه به هم، برابر و در نتیجه با وزن یکسان در نظر گرفته شد. ساخت مدل پروکسی و همچنین فرآیند بهینه‌سازی بر اساس این تابع هدف انجام گرفت. وزن‌های متغیرهای پاسخ برای تولید نفت، فشار ته چاه[2] و فشار ۹ نقطه[3]، به ترتیب برابر ۱، ۱ و ۶ در نظر گرفته شد. در مدل مورد بررسی، تولید گازی گزارش نشده و همچنین میزان تولید آب بسیار کم و ناچیز بود. لذا برای متغیرهای پاسخ، پارامترهای تولید آب و گاز در نظر گرفته نشد.

شرح مدل

میدان مورد مطالعه دارای ابعاد تقریبی ۲۳×۶/۵ km و متشکل از یک مخزن کربناته که در ۲۵ km جنوب غربی ایران واقع شده است. مدل مخزن بزرگ مقیاس شده[4] از مدل زمین‌شناسی سه بعدی که اندازه شبکه فضایی آن ۱۰۰×۱۰۰ متر و مربع شکل است. مخزن مورد مطالعه به ۳ لایه تقسیم شده و تنها یکی از این لایه‌ها، مخزن اصلی نفت است. این لایه زمین‌شناسی به زیرلایه‌های بیشتری در مدل مقیاس بالای مخزن تقسیم‌بندی شده است. به طور کلی، ۳۰ لایه مخزن در مدل شبیه‌سازی تعریف شده بود. ضخامت‌های لایه‌ها بسته به مشخصات مخزن از ۲/۵۴ تا ۵/۰۲ m با مقدار میانگین ۳/۵۸ m هستند. همچنین مدل به ۸۸ سلول در جهت X، ۲۷۵ سلول در جهت Y و ۳۰ سلول در جهت Z شبکه‌بندی شده و در نتیجه تعداد کل سلول‌ها[5] ۸۸×۲۷۵×۳۰=۷۲۶۰۰۰ است. دید ۳ بعدی خواص شبکه یعنی تخلخل، نفوذپذیری و موقعیت چاه‌ها به ترتیب در شکل ۳ تا ۵ نمایش داده شده‌اند.

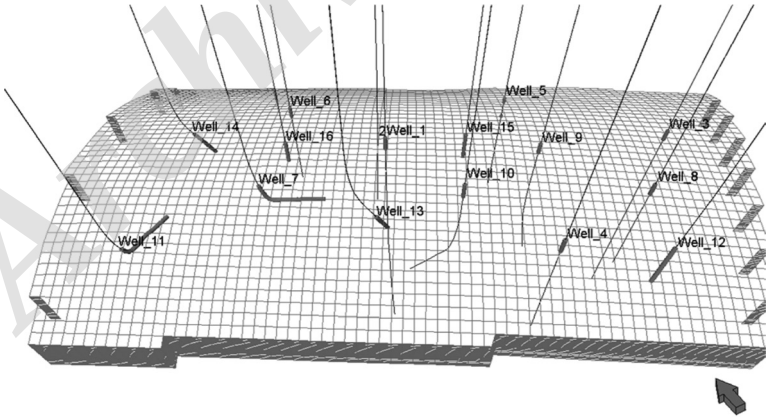
1. Standard Deviation
2. Botoom Hole Perssure (BHP)
3. BP9
4. Up-Scaled
5. Cells

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳ شمای ۳ بعدی تخلخل مخزن

شکل ۴ شمای ۳ بعدی نفوذپذیری مخزن



شکل ۵ نمایش ۳ بعدی مدل مخزن و موقعیت چاه‌ها

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ۱۴ چاه فعال در این میدان به‌صورت عمودی، افقی و انحرافی وجود دارند. رنگ سبز در چاه‌ها نشانه فواصل مشبک‌کاری[1] و رنگ قرمز رنگ نشانه وجود بیش از یک شاخص بهره‌وری[2] در فواصل زمانی تولید با توجه به اتفاقاتی مانند مسائل تولید یا حتی انگیزش چاه و اسیدکاری در برخی از چاه‌هاست.

پارامترها

با توجه به همه اطلاعات مخزن مورد مطالعه و دانش تجربی، ۲۱ پارامتر اصلی برای ساخت پروکسی متشکل از خصوصیات سنگ مخزن، آبده[3]

1. Perforations
2. PI
3. Aquifer

Archive of SID

www.SID.ir

و ویژگی‌های اصلی هر چاه درنظر گرفته شد. خصوصیات اصلی سنگ مخزن برای این مطالعه، تراکم‌پذیری[1]، نسبت نفوذپذیری عمودی به افقی ($\frac{k_y}{k_x}$) و برای خصوصیات آبده، نفوذپذیری آبده، تخلخل، تراکم‌پذیری کل و ضخامت آبده لحاظ گردید.

متغیرهای زیادی هستند که بر روی ریسپانس‌های خروجی (و در نتیجه تابع هدف) اثر دارد که نوع این متغیرها با توجه به دانش تجربی و در نظرگیری نوع، اندازه مخزن و زمان مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی، یک یا چند دسته از این پارامترها مشخص می‌شوند که هردسته شامل چندین متغیر ولی از یک نوع پارامتر اند. از بین این دسته‌ها، باتوجه به سابقه قبلی کاربر روی این نوع مخازن، یک دسته که بیشترین تاثیر را بر روی پاسخ‌ها دارد انتخاب شد. این دسته خود شامل چندین پارامتر است که هرکدام شامل محدوده‌ای از پارامترهای مهم هر یک از چاه‌هاست. در ادامه تاثیر هرکدام از این پارامترها بر پاسخ‌های تابع هدف مخزن ارزیابی و پارامترهایی که بر روی پاسخ مشخص تاثیری نداشتند حذف شدند.

برای مشخص‌سازی پارامترهای هر چاه، به ازای هر چاه یک منطقه[2] و طبیعتا ۱۴ منطقه بر اساس فواصل هر چاه تعریف شد، به بیانی برای هر چاه یک منطقه به‌صورتی که در شکل ۶ نشان داده شده، معرفی شده است. مهمترین ویژگی‌های هرچاه، یکی تعریف ضریب نفوذپذیری[3] برای هرچاه است. در نتیجه ۱۴ ضریب نفوذپذیری هم تعریف شد.

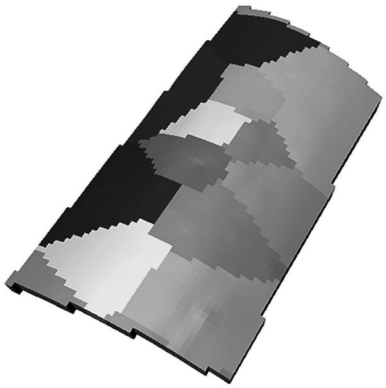
به دلیل نداشتن کاهش ارتفاع آب و GOR متغیر، پارامترهای مربوط به این پاسخ‌ها همچون نفوذپذیری نسبی (از آب یا گاز) نادیده گرفته شده است. سایر پارامترها دارای سطح مناسبی از دقت هستند. عموما تعداد پارامترها و نمونه‌ها بستگی به منابع سخت‌افزاری و زمان دارد.

نتایج و بحث

برای تطابق تاریخچه خودکار، تولید نمونه و غربال‌گری، ساخت و تایید مدل پروکسی و بهینه‌سازی نهایی انجام شد. برای انتخاب داده و تولید نمونه‌های اولیه از روش CCF استفاده شد. برای ساخت پروکسی از روش RSM و برای بهینه‌سازی از الگوریتم GA استفاده شد. نتایج هر بخش به قرار زیر است:

تولید نمونه

۲۵۶ نمونه با استفاده از طراحی CCF که از پارامترهای تعریف شده در جدول ۱ استفاده می‌کند تولید شد. در این جدول، ۲۱ پارامتر نشان داده شده که برای ساخت پروکسی با مقادیر حداقل و حداکثرشان استفاده می‌شود. این مقادیر براساس اطلاعات میدان‌های مطالعه شده مجاور و همچنین بر طبق مفاهیم مهندسی مخزن انتخاب شدند.



شکل ۶- ۱۴ منطقه معرفی شده برای مطالعه مخزن (منطقه‌ای برای هر چاه)

1. Compressibility
2. Region
3. Permeability Multiplier

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- ۲۱ پارامتر که برای ساخت مدل پروکسی مورد استفاده قرار گرفت

شماره پارامتر	پارامترهای مورد بررسی	حداقل	حداکثر
۱	ضریب تراکم‌پذیری سنگ (1/psi)	۲×۱۰^{-۶}	۶×۱۰^{-۶}
۲	نسبت تراوایی عمودی به افقی	۰/۴	۰/۸
۳	تراوایی نسبی آبده (md)	۰/۱	۰/۶
۴	ضریب تراکم‌پذیری آبده (1/psi)	۲×۱۰^{-۶}	۸×۱۰^{-۶}
۵	ضخامت آبده (ft)	۳۰۰	۴۰۰
۶	ضریب تراوایی (۱)	۰/۲	۳
۷	ضریب تراوایی (۳)	۰/۲	۳
۸	ضریب تراوایی (۴)	۰/۲	۳
۹	ضریب تراوایی (۵)	۰/۲	۳
۱۰	ضریب تراوایی (۶)	۰/۲	۳
۱۱	ضریب تراوایی (۸)	۰/۲	۳
۱۲	ضریب تراوایی (۱۰)	۰/۲	۳
۱۳	ضریب تراوایی (۱۲)	۰/۲	۳
۱۴	ضریب تراوایی (۱۴)	۰/۲	۳
۱۵	ضریب شاخص بهره دهی (۱)	۰/۵	۱۵
۱۶	ضریب شاخص بهره دهی (۳)	۰/۵	۱۵
۱۷	ضریب شاخص بهره دهی (۴)	۰/۵	۱۵
۱۸	ضریب شاخص بهره دهی (۷)	۰/۵	۱۵
۱۹	ضریب شاخص بهره دهی(۸)	۰/۵	۱۵
۲۰	ضریب شاخص بهره دهی(۹)	۰/۵	۱۵
۲۱	ضریب شاخص بهره دهی(۱۰)	۰/۵	۱۵

گرچه در نظر گرفتن تمامی این پارامترها در برخی اوقات منجر به عدم همگرایی در اجراها و بالتبع افزایش زمان شبیه‌سازی می‌شود و معمولا این گونه پارامترهای مشکل‌ساز را نادیده می‌انگارند، ولی از آنجاکه احتمال می‌رفت حذف برخی نمونه‌ها ممکن است تاثیرات نامناسبی از جمله کاهش دقت و بالابردن میزان خطای میانگین بر پروکسی تولید شده بگذارد، در این مطالعه تمامی عملیات‌های اجرا با این پارامترها صورت گرفت و تعداد این اجراها[1] به ۲۵۶ رسید.

ساخت پروکسی و اعتبارسنجی[2]

همان‌طور که اشاره شد برای ساخت مدل پروکسی جایگزین شبیه‌ساز، روش سطح رویه پاسخ مورد استفاده قرار گرفت. نکته مهم در استفاده از روش ساخت پروکسی، بررسی دقت مدل و اعتبارسنجی آن است. برای رسیدن به این هدف، عدد p مورد توجه قرار می‌گیرد. این عدد، معیار سنجش وابستگی پاسخ به متغیرهای در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که مقادیر کمتر از ریسک مجاز برای قضاوت آماری (الفا) (که در اینجا ۰/۰۵در نظر گرفته شده است) قابل اتکاست. اگر محاسبات p ما را به این نتیجه برساند که ضریب به‌دست آمده قابل صرف نظر کردن است، می‌بایست محاسبات

1. Runs
2. Proxy Validation

Archive of SID

www.SID.ir

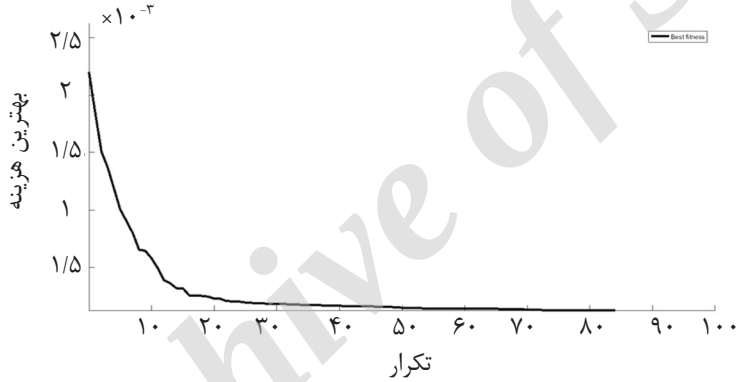
را مجددا تعریف و عامل مورد اشاره را از محاسبات ترم خارج کرد. زمانی که یک فرضیه در حال اجراست، باید توجه به مقدار عدد p در فاصله اعداد صفر تا یک باشد. چنانچه این عدد از میزان ۰/۰۵ کمتر باشد، نتیجه قابل قبول نیست، اما برای مقادیر بزرگتر از ۰/۰۵، مدل ساخته شده قابل اتکاست.

بهینه‌سازی

پس از ساخت مدل پروکسی و اعتبارسنجی، مرحله آخر یعنی بهینه‌سازی انجام شد. برای بهینه‌سازی پارامترهای جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۷ نتایج استفاده از روش بهینه‌سازی الگورتیم ژنیتک را نشان می‌دهد. در این روش با کاهش مقدار تابع هدف از 10^{-6}، فرآیند بهینه‌سازی در اجرای ۸۲ به‌طور کامل متوقف شد. همچنین جدول ۲ و ۳، خصوصیات و مقادیر دو الگوریتم مورد استفاده را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز مقادیر بهینه شده همه ۲۱ پارامتر را گزارش می‌کند. لازم به ذکر است که مقادیر به‌دست آمده در بسیاری از پارامترها، کاملا با مقادیر اولیه متفاوت است.

اعمال بهترین جواب‌ها

در این بخش، پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده از هر دو الگوریتم بهینه‌ساز، به اجرا گذاشته می‌شود. شکل‌های ۸ تا ۱۳ نتایج حاصل از تطابق تاریخچه خودکار را برای مدل مورد مطالعه برای هر دوحالت میدان و چاه‌ها نمایش می‌دهد (به دلیل فراوانی تعداد شکل‌ها، نمونه‌هایی از نتایج چند چاه ارائه می‌شود).



شکل ۷ نتایج بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک بر روی مدل پروکسی ساخته شده

جدول ۲ ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک ساخته شده

اندازه جمعیت	۳۰۰
احتمال وقوع جهش	۰/۱
نوع تقاطع	یکنواخت
احتمال تقاطع	۰/۸
نسل	۱۰۰
نوع جهش	تصادفی

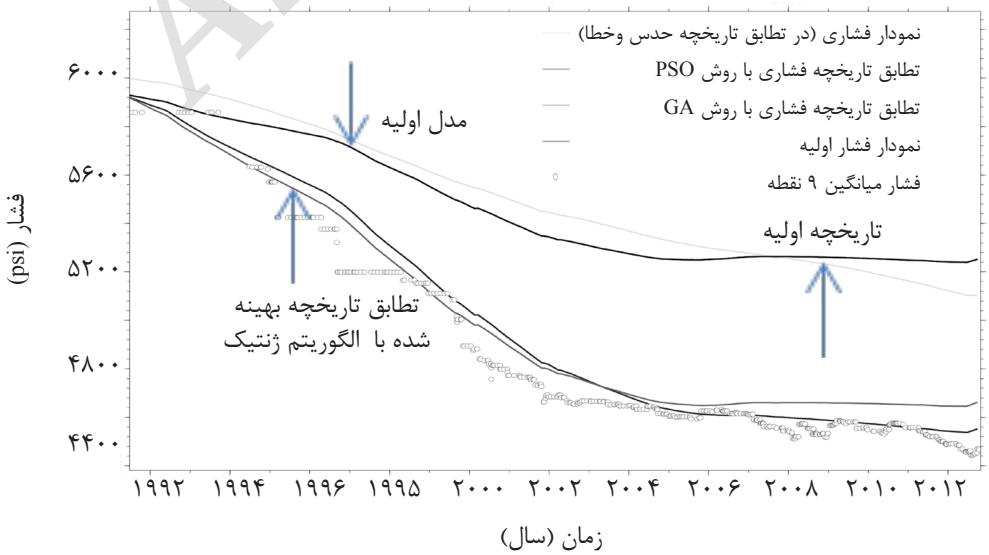
جدول ۳ ویژگی‌های PSO ساخته شده

اندازه جمعیت	۳۰۰
تعداد پارامترها	۴۴
ضریب یادگیری شخصی	۱/۵
ضریب یادگیری جمعی	۲

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴ مقادیر به‌دست آمده پس از اعمال مدل جایگزین بهینه شده

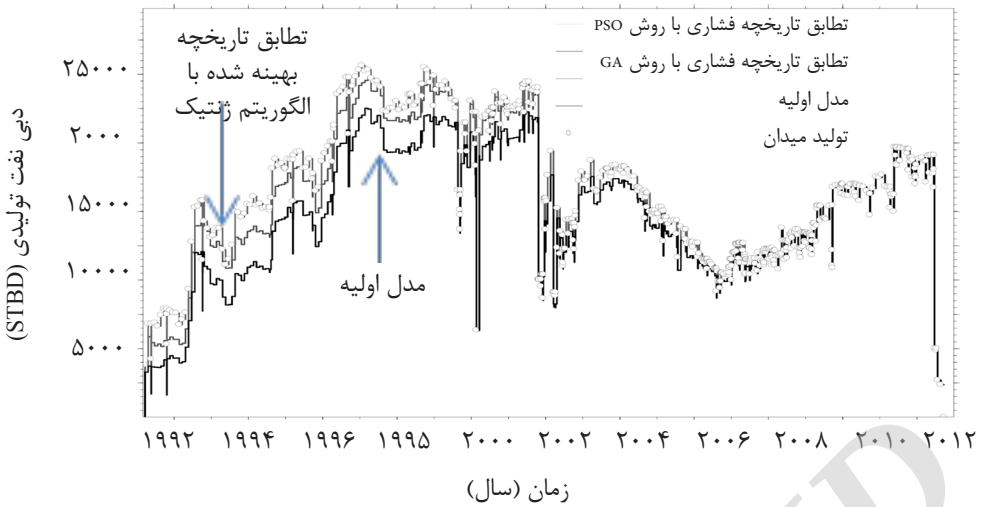
شماره پارامتر	پارامترهای مورد بررسی	حداقل	حداکثر
۱	ضریب تراکم‌پذیری سنگ	$۲/۰۷\times۱۰^{-۶}$	$۲/۱۲\times۱۰^{-۶}$
۲	نسبت تراوایی	۰/۴۹	۰/۸۶
۳	تراوایی نسبی آبده (md)	۱۱/۰۹	۹۷/۱۸
۴	ضریب تراکم‌پذیری آبده (1/psi)	$۲/۱۵\times۱۰^{-۶}$	$۳/۸۱\times۱۰^{-۶}$
۵	ضخامت آبده (ft)	۳۰۵	۳۴۹
۶	ضریب تراوایی(۱)	۰/۶	۲/۸۱
۷	ضریب تراوایی (۳)	۰/۶۵	۲/۸۱
۸	ضریب تراوایی (۴)	۰/۷۲	۲/۸۵
۹	ضریب تراوایی (۵)	۰/۵۵	۰/۷۳
۱۰	ضریب تراوایی (۶)	۰/۵۱	۰/۷۱
۱۱	ضریب تراوایی (۸)	۰/۶۵	۲/۸۲
۱۲	ضریب تراوایی (۱۰)	۰/۵۱	۲/۵
۱۳	ضریب تراوایی (۱۲)	۰/۵۰	۲/۵
۱۴	ضریب تراوایی (۱۴)	۰/۵۰	۲/۴
۱۵	ضریب شاخص بهره‌دهی (۱)	۱/۲	۱۰
۱۶	ضریب شاخص بهره‌دهی (۳)	۱/۲۵	۱۰
۱۷	ضریب شاخص بهره‌دهی (۴)	۰/۸۵	۱۲
۱۸	ضریب شاخص بهره‌دهی (۷)	۱/۵	۸
۱۹	ضریب شاخص بهره‌دهی (۸)	۱/۵	۸
۲۰	ضریب شاخص بهره‌دهی (۹)	۲/۲۵	۱۲
۲۱	ضریب شاخص بهره‌دهی (۱۰)	۱/۵	۸



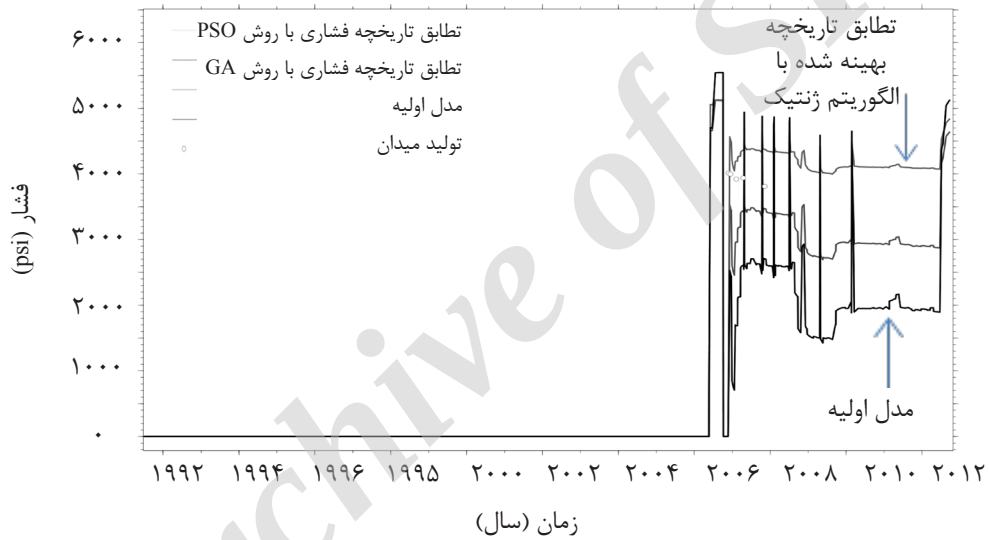
شکل ۸ مقایسه تطابق تاریخچه داده‌های فشار میانگین

Archive of SID

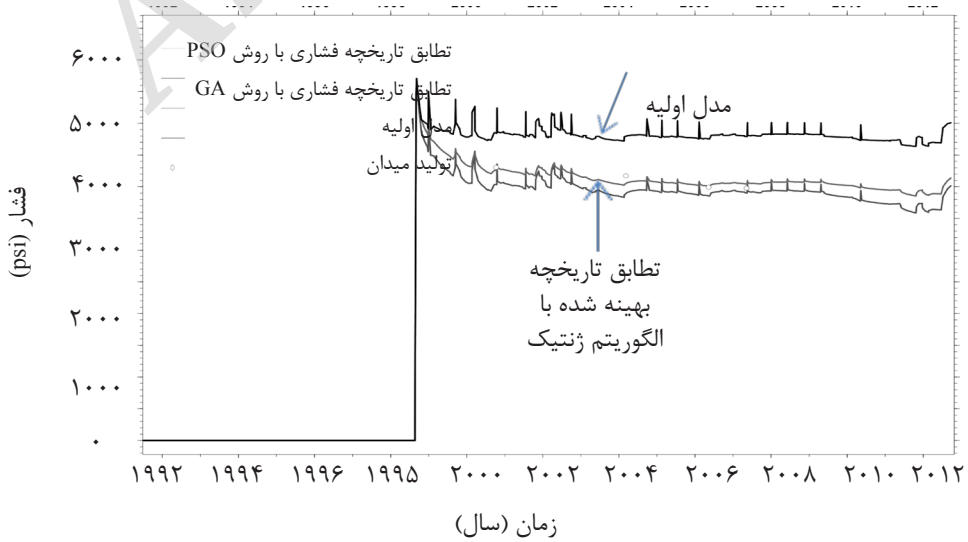
www.SID.ir



شکل ۹ تطابق تاریخچه داده‌های تولید میدان

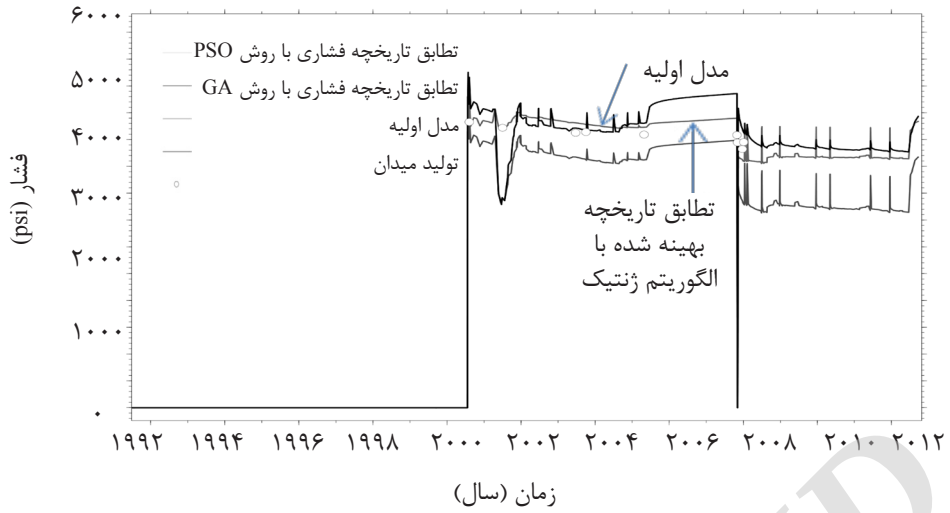


شکل ۱۰ نتایج تطابق تاریخچه فشار ته چاهی در چاه ۵

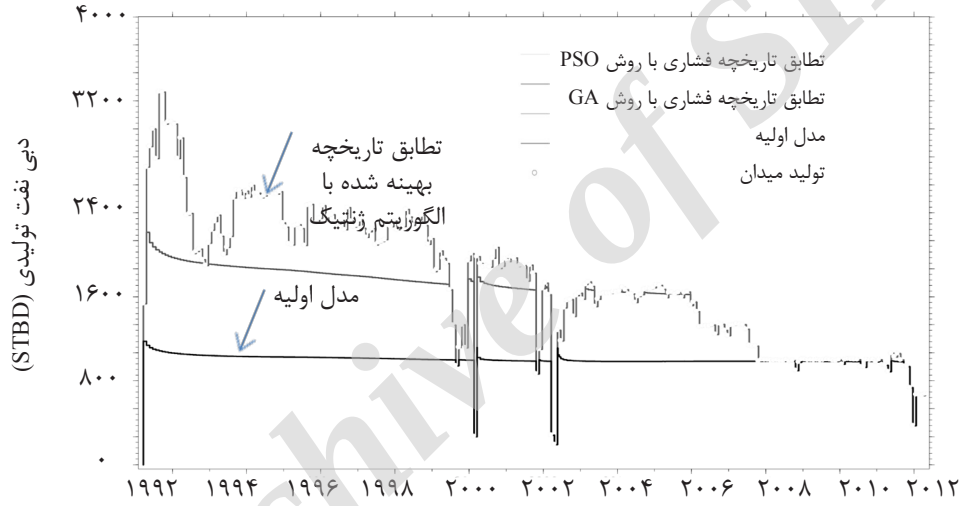


شکل ۱۱ نتایج تطابق تاریخچه فشار ته چاهی در چاه ۱۱

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۲ نتایج تطابق تاریخچه فشار ته چاهی در چاه ۱۳



شکل ۱۳ نتایج تطابق تاریخچه تولید چاه ۳

روش کار به‌کار گرفته شده حاکی از نتایج خوب و قابل قبول برای تطابق تاریخچه چاه‌ها و میدان است.

کل میدان

شکل‌های ۸ و ۹ نتایج حاصل از تطابق تاریخچه را برای تولید کل میدان و فشار میانگین (۹نقطه) کل میدان نمایش می‌دهد. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهد نتایج حاصل از تطابق تاریخچه با ساخت پروکسی مدل و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک، بسیار نزدیک به داده‌های مشاهده‌ای است. (در شکل ۸، منظور از PSObest، بهترین جواب در حالت استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات است). همچنین شکل ۹، نتایج تطابق تاریخچه برای داده‌های تولید میدان را در حالات مختلف نشان می‌دهد. در این حالت نیز نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نتایج بسیار خوب و قابل قبولی است.

مقیاس چاه‌ها

در این بخش، نتایج تطابق تاریخچه برای چاه‌ها برای داده‌های فشار ته چاهی، فشار میانگین و تولید هر چاه در حالت الگوریتم پروکسی استفاده شده ارائه شده است. به دلیل کثرت نمودارها و نتایج، در اینجا برای هر کدام از متغیرها، چند نمونه آورده شده است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، نتایج

Archive of SID

www.SID.ir

تطابق تاریخچه برای فشار ته چاهی چاه‌های ۵، ۱۱ و ۱۳ را نشان می‌دهد. شکل ۱۳، معرف نتایج تولید نفت در چاه ۳ است. همان‌طور که مشخص است نتایج حاصل از الگوریتم به‌کار گرفته شده مورد قبول است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، متدولوژی جدیدی برای انجام تطابق تاریخچه یکی از میادین بزرگ ایران انجام شد. در این مقاله رویکرد مدل جایگزین (پروکسی) برای تطابق تاریخچه خودکار در یک میدان بزرگ در جنوب ایران با ۱۴ چاه با متغیرهای پاسخ‌های (تولید نفت، فشار ته چاه و فشار میانگین) استفاده شده است. روشی که به عنوان مدل پروکسی استفاده شده است روش رویه سطح پاسخ که در آن ۲۱ پارامتر برای ساخت مدل با استفاده از روش CCF معرفی شده است. سپس برای پروکسی ساخته شده با استفاده از یک روش پرکاربرد بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام شد. روش کار استفاده شده در این مقاله کدنویسی و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Matlab و لینک آن با یکی از مهمترین نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مخزن (Eclipse) برای بررسی و نهایی‌سازی پارامترها بود. در نتیجه، ساخت مدل پروکسی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک با استفاده از ۲۵۶ نمونه با R^2 ۰/۹ موفق عمل کرد. جامع‌نگری در فرآیند ساخت مدل با ترکیبی از الگوریتم‌های ساخت مدل پروکسی، روش‌های نمونه‌گیری و الگوریتم‌های بهینه‌ساز تصادفی به همراه مباحث فنی و تجربی دانش مخزن از اهداف اصلی این مقاله بوده است.

مراجع

[1]. Arief I. H., "*Assisted history matching: a comprehensive study of methodology*", in Faculty of Science and Technology, Stavanger, 2013.

[2]. Denney D., "*Pros and cons of applying a proxy model as a substitute for full reservoir simulations*", Journal of Petroleum Technology, Vol. 62, p. 07, 2010.

[3]. Azad A. and Chalaturnyk R., "*Application of analytical proxy models in reservoir estimation for SAGD process: UTF-project case study*," SPE-165576-PA, Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 52, 2013.

[4]. Fedutenko E., Yang C., Card C. and Nghiem L. X., "*Time-dependent proxy modeling of SAGD process*," in SPE Heavy Oil Conference-Canada, SPE-165395-MS: Calgary, Alberta, Canada, 2013.

[5]. Fedutenko E., Yang C. Card C. and Nghiem L. X., "*Time-dependent neural network based proxy modeling of SAGD process*," in SPE Heavy Oil Conference-Canada, SPE-170085-MS: Calgary, Alberta, Canada, 2014.

[6]. Ghasemi M. and Whitson C. H., "*Modeling SAGD with a black-oil proxy*," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-147072-MS: Denver, Colorado, USA, 2011.

[7]. Yao S. and Prasad V., "*Proxy modeling of the production profiles of SAGD reservoirs based on system identification*," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 54 (33), pp 8356–8367, DOI: 10.1021/ie502258z 2015.

[8]. Amini S., Mohaghegh S. D., Gaskari R. and Bromhal G. S., "*Pattern recognition and data-driven analytics for fast and accurate replication of complex numerical reservoir models at the grid block level*," in SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition, SPE-167897-MS: Utrecht, The Netherlands, 2014.

[9]. Haghighat S. A., Mohaghegh Sh. D., Gholami V., Shahkarami A. R. and Moreno D. A. "*Using big data and*

Archive of SID
www.SID.ir

smart field technology for detecting leakage in a CO_2 storage projects," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition., SPE 166137: New Orleans, Louisiana, USA, 2013.

[10]. Suykens A. K., Gestel T. V. and Brabanter J. D., "*Least square support vector machines*," Singapore World Scientific Publishing Co. 2002,

[11]. Ahmadi M. A. and A. Bahadori, "*A LSSVM approach for determining well placement and conning phenomena in horizontal wells*," Fuel, Vol. 153, pp. 276–283, 2015.

[12]. Espinoza M., JohanA., Suykens K. and Moor B. D., "*Least square support vector machines and primal space estimation*," in 42nd IEEE Conference on Decision and Control,: Maui,Hawaii, USA, 2003.

[13]. Panja P., Pathak M., Velasco R. and Deo M., "*Least square support vector machine :an emerging tool for data analysis*," in SPE Low Perm Symposium., SPE-180202-MS: Denver, Colorado, USA, 2016.

[14]. Mohamed Al-akhdar S. and Yu Ding D., "*An integrated parameterization and optimization methodology for assisted history matching: application to libyan field case*," in North Africa Technical Conference and Exhibition., Society of Petroleum Engineers, SPE-150716-MS: Cairo, Egypt, 2012.

[15]. Wang s., ZHAO G., XU L., GUO D. and SUN S. "*Optimization for automatic history matching*," International Journal of Numerical Analysis and Modeling, Vol. 2, pp. 131-137, 2005.

[16]. Dehghan Monfared A., Helalizadeh A., Parvizi H. and Zobeidi K., "*A global optimization technique using gradient information for history matching*," Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,. 36(Taylor & Francis), pp. 1414–1428, 2014.

[17]. Mohaghegh S. D., Toro J., Wilson T. H., Artun E., Sanchez A. and Pyakurel S., "*An intelligent systems approach to reservoir characterization*," U.S. Department of Energy, 2005.

[18]. Dehghan Monfared A., Helalizadeh A. and Parvizi H., "*Automatic history matching using the integration of response surface modeling with a genetic algorithm*," Petroleum Science and Technology, 30(Taylor & Francis Group, LLC): pp. 360-374, 2012.

[19]. He J., Xie J., Wen X. H. and Chen W., "*Improved proxy for history matching using proxy-for-data approach and reduced order modeling*," in SPE Western Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, SPE-174055-MS: California, USA, 2015.

Archive of SID

www.SID.ir